

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DO ESCOAMENTO TURBULENTO SOBRE UM
CILINDRO EM CANAL AERODINÂMICO

por

Christian Augusto Wartchow

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2014

SIMULAÇÃO DE GRANDES ESCALAS DO ESCOAMENTO TURBULENTO SOBRE UM
CILINDRO EM CANAL AERODINÂMICO

por

Christian Augusto Wartchow

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientador: Prof. Adriane Prisco Petry

Comissão de Avaliação:

Prof. Horácio Antonio Vielmo

Prof. Paulo Otto Beyer

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 4 de Julho de 2014.

AGRADECIMENTOS

Venho agradecer principalmente à minha família pelo apoio durante toda minha vida, meu pai Hans Dieter Wartchow, minha mãe Marli Lenz Wartchow e a minha irmã Krista Minéia Wartchow.

À minha professora orientadora Adriane Prisco Petry por me ajudar na realização deste trabalho como em outras etapas da minha vida acadêmica.

Ao Grupo de Estudos Térmicos e Energéticos (GESTE), da Universidade do Rio Grande do Sul. Em especial para o membro João Vicente Akwa que me ajudou fornecendo material e resultados para utilização.

Ao Centro Nacional de Supercomputação (CESUP), pelo oferecimento dos recursos computacionais para a maioria das simulações computacionais realizadas no presente trabalho.

Aos meus colegas e amigos de graduação Felipe Coelho, Grégori Fronza, Guilherme Fraga, Henrique Alves, Herberth Frölich, Luciano Paludo, Maurício Lazzari e Tomás Paganin que estiveram comigo durante todos esses anos, dando suporte e companhia.

WARTCHOW, C. A. **Simulação de Grandes Escalas do Escoamento Turbulento sobre um Cilindro em Canal Aerodinâmico**. 2014. Nº 23. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma Simulação de Grandes Escalas (LES) do escoamento turbulento sobre um cilindro em canal aerodinâmico com uma alta razão de bloqueio. Esta simulação usa o modelo de submalha Smagorinsky-Lilly resolvido pelo software comercial de volumes finitos ANSYS Fluent. O cilindro tem 500 mm de diâmetro e causa uma razão de bloqueio de 25,91%. Parâmetros esses retirados para comparação de Akwa et al, 2014, que realizou estudos experimentais e simulações utilizando modelagem com as equações de Navier-Stokes Médias de Reynolds (RANS) com o modelo de turbulência k- ω SST. O principal resultado comparado para avaliar a simulação é o número de Strouhal. Neste trabalho obteve-se um valor do número de Strouhal igual a 0,247 na simulação de grandes escalas, que quando comparado com o resultado obtido pelo modelo das equações de Reynolds de 0,233, ambos se aproximam do resultado experimental de 0,246. Também foi feita uma análise qualitativa dos resultados de turbulência indicando que a simulação foi bem sucedida, que a tridimensionalidade é relevante e que futuros trabalhos baseados na mesma metodologia devem contribuir para o avanço do estudo do escoamento turbulento sobre corpos cilíndricos.

PALAVRAS-CHAVE: Cilindro Circular. Alta Razão de Bloqueio. Simulação de Grandes Escalas. Número de Strouhal.

WARTCHOW, C. A. **Large Eddy Simulation of the Turbulent Flow over a Cylinder in Aerodynamic Channel**. 2014. N° 23. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ABSTRACT

This paper discusses a Large Eddy Simulation (LES) of the turbulent flow over a cylinder in aerodynamic channel with a high blockage ratio. This simulation uses the Smagorinsky-Lilly sub-grid model solved by the Finite Volume Method commercial software ANSYS Fluent. The cylinder diameter is 500 mm and causes a blockage ratio of 25.91%. These parameters taken for comparison from Akwa et al, 2014, that performed experimental studies and simulations using Reynolds Averaged Navier-Stokes model (RANS) such as k- ω SST. The primary outcome compared to evaluate the simulation is the Strouhal number. In this paper we obtained a value of the Strouhal number equal to 0.247 in the Large Eddy Simulation, when compared with the results obtained by the Reynolds Averaged Navier-Stokes model of 0,233, both are close to the experimental result of 0,246. A qualitative analysis of the results of turbulence was also taken indicating that the simulation was successful, that it's tridimensionality is relevant and that future works based on the same methodology should contribute to the advancement of the study of the turbulent flow over cylindrical bodies.

KEYWORDS: Circular Cylinder. High Blockage Ratio. Large Eddy Simulation. Strouhal Number.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. METODOLOGIA	2
4.1. VOLUMES FINITOS	2
4.2. MODELAGEM MATEMÁTICA	2
4.2.1. Equações Médias de Reynolds.....	2
4.2.2. Equações para Simulação de Grandes Escalas	3
4.2.3. Número de Strouhal.....	3
4.3. MODELAGEM NUMÉRICA	4
4.3.1. Função de Interpolação	4
4.3.2. Programa utilizado	4
4.3.3. Condição Inicial e Critério de Parada Adotado.....	4
4.3.4. Modelagem da Turbulência.....	5
4.4. MODELO COMPUTACIONAL	5
4.4.1. Geometria	5
4.4.2. Condições de Contorno	6
4.4.3. Qualidade da Malha.....	6
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	6
5.1. AVALIAÇÃO COMPARATIVA COM DADOS EXPERIMENTAIS	6
5.2. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO.....	9
6. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE A	15
ANEXO A	17

1. INTRODUÇÃO

Estruturas cilíndricas são muito comuns em várias aplicações da engenharia, como torres, tubulações, entre outras aplicações. O estudo detalhado do escoamento e volta deste tipo de estruturas é de fundamental importância na implantação e análise de projetos relacionados [De Paula, 2008]. O estudo computacional da dinâmica de fluidos em volta de cilindros tem tido maior interesse nas últimas décadas. Isso se deve principalmente pelo avanço tecnológico da informática. Em muitos estudos numéricos do escoamento em volta de superfícies cilíndricas com geometrias simples foram considerados apenas 2 dimensões de domínio, ou mesmo com planos simétricos. Esses métodos foram usados para diminuir o custo computacional, porém a formação de vórtices é um fenômeno que ocorre em 3 dimensões [Meneghini et al, 2010].

O escoamento turbulento ao redor de um cilindro, estudado por [Akwa et al, 2014] experimentalmente e numericamente através da solução das equações médias de Reynolds, é analisado neste trabalho. A solução é obtida empregando simulação de grandes escalas com o número de Reynolds do escoamento é igual a 40.000 e a razão de bloqueio é 25,91 %.

A simulação de grandes escalas é adequada para abordar escoamentos altamente transientes, quando existe interesse em avaliar picos de velocidades ou pressões. Esta é indicada para análise de escoamentos complexos como escoamento interagindo com corpos imersos [Jansen, 1999].

Para a realização do trabalho emprega-se o software comercial ANSYS Fluent que utiliza o método de volumes finitos para resolver as equações de Navier-Stokes. Com o auxílio do software pode-se obter resultados mais específicos num menor tempo de pesquisa [Maliska, 2004].

2. OBJETIVOS

Neste trabalho, é feita uma Simulação de Grandes Escalas do escoamento turbulento em volta de um cilindro com a finalidade de avaliar a diferença com os resultados obtidos por Akwa, 2014, através da solução por equações médias de Reynolds. Estes indicados principalmente pelo valor do número de Strouhal. O estudo visa também identificar qualitativamente o escoamento no canal aerodinâmico após a passagem pelo cilindro e mostrar como a turbulência se comporta tridimensionalmente. Indicando as vantagens de um modelo para Simulações de Grandes Escalas e a importância da tridimensionalidade nas simulações de escoamentos turbulentos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O escoamento em torno do cilindro possui uma importante característica tridimensional, a terceira dimensão de um cilindro, sua altura, é importante no desenvolvimento de vórtices. Não pode ser dito que todas as seções do cilindro ao longo da altura tem o mesmo comportamento em tempo sincronizado [Meneghini et al, 2010].

No artigo de Silveira e Möller, 2010, observou-se que para números de Reynolds mais baixos, o número de Strouhal diminuía à exceção de razões de bloqueios mais altas. As variações mais abruptas do número de Strouhal, de acordo com o observado, ocorrem para razões de bloqueio altas, velocidades maiores, no caso deste trabalho, de 15 m/s e, por consequência, para números de Reynolds mais altos.

Rae e Pope, 1984, diz que a existência de barreiras laterais para o escoamento em torno de um corpo, como as encontradas em um túnel aerodinâmico, produz dois efeitos de bloqueio simultâneo. Um deles, o bloqueio sólido, é causado pela redução da área de passagem do escoamento em torno do corpo devido à presença deste na seção de destes; pela continuidade e pela equação de Bernoulli, a velocidade na região aumenta. Em um canal

fechado, o efeito do bloqueio sólido é o mesmo que um aumento de pressão dinâmica, aumentando as forças e os momentos agindo sobre o cilindro.

Segundo Kalro e Tazduyar, 1997, simulações de grandes escalas (*LES*) são diferentes das simulações de equações médias de Reynolds (*RANS*) que modela todo regime de turbulência e apenas escoamentos médios são calculados. Simulações de grandes escalas tipicamente precisam de uma malha mais refinada e são capazes de obter melhores efeitos transientes de turbulência. É mostrado que uso de simulações de grandes escalas para número de $Re = 10.000$ possui resultados muito bons em computação paralela 3D. Onde resultados de coeficientes de arrasto e número de Strouhal tem valores de excelente concordância com resultados experimentais.

4. METODOLOGIA

Foi empregada neste trabalho a Dinâmica dos Fluidos Computacional com o uso do software ANSYS Fluent. Software este que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações governantes no escoamento.

4.1. VOLUMES FINITOS

Com o método de volumes finitos, o domínio em estudo é dividido em um número finito de volumes de controle. Essa discretização transforma as equações diferenciais do escoamento em um sistema linear de equações algébricas, que é resolvido iterativamente. Graças a substituição de diferenças infinitesimais por diferenças finitas entra as variáveis, que são velocidade e pressão. Assim a cada centroide de cada volume são atribuídos os valores calculados. Com isso a solução está limitada ao número de volumes presentes no domínio de cálculo [Maliska, 2004].

4.2. MODELAGEM MATEMATICA

Serão apresentados resultados de uma Simulação de Grandes Escalas (*LES*, do inglês *Large Eddy Simulation*) e comparados com Simulação Numérica de Escoamentos Turbulentos via Equações Médias de Reynolds (*RANS*, do inglês *Reynolds Averaged Navier-Stokes*).

4.2.1. Equações Médias de Reynolds

Empregam-se as equações médias de Reynolds na simulação comparada deste trabalho. A equação (4.1) representa o balanço de massa. Os índices repetidos são índices mudos, é considerada a convenção do somatório de Einstein.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{u}_i + \bar{u}'_i) = 0 \quad (4.1)$$

onde \bar{u}_i é uma componente de velocidade média do ar no escoamento e u'_i é a flutuação devido aos efeitos da turbulência e x representa a direção do escoamento.

A equação (4.2) representa o balanço da quantidade de movimento.

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\mu}{\rho} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u'_i u'_j} \quad (4.2)$$

onde \bar{p} é a média temporal da pressão, o termo u'_i é a flutuação da velocidade do escoamento na direção i , devido aos efeitos da turbulência, ρ é a massa específica do fluido, μ é a

viscosidade dinâmica do fluido e $\overline{u'_i u'_j}$ é o tensor de tensões de Reynolds que introduz seis incógnitas adicionais [Star-CCM+, 2008]. Para resolução dessas incógnitas é necessário o uso de modelos de turbulência. No trabalho de Akwa et al, 2014, é utilizado o modelo de turbulência K- ω SST.

E finalmente, a equação (4.3) apresenta o Número de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho U d_r}{\mu} \quad (4.3)$$

onde Re é o Número de Reynolds, d_r é o diâmetro do cilindro e U a velocidade livre do meio. Outras variáveis já apresentadas.

4.2.2. Equações para Simulação de Grandes Escalas

As equações governantes usadas em *LES* são obtidas filtrando as equações dependentes do tempo de Navier-Stokes. Após o filtro é obtidas a equação (4.4).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{u}_i) = 0 \quad (4.4)$$

onde as variáveis já foram apresentadas na Seção 4.2.3. E a equação (4.5).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_i \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (4.5)$$

onde τ_{ij} é o tensor de Reynolds submalha definida pela equação (4.6). A equação (4.7) apresenta a aproximação de Boussinesq definindo o conceito de viscosidade turbulenta. O modelo de turbulência empregado calcula o valor desta viscosidade localmente.

$$\tau_{ij} \equiv \rho \overline{u'_i u'_j} - \rho \bar{u}_i \bar{u}_j \quad (4.6)$$

$$\tau_{ij} = -\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4.7)$$

onde estas incógnitas precisam de modelos de turbulência para serem resolvidos [ANSYS, 2009a]. Neste trabalho é utilizado o modelo de submalha Smagorinsky-Lilly.

4.2.3. Número de Strouhal

É um número adimensional que caracteriza um escoamento. Por se tratar de um fenômeno que envolve a geração e desprendimento de vórtices de maneira alternada, portanto, um escoamento transiente, há uma frequência característica de emissão de vórtices para cada condição de escoamento que depende, basicamente, da velocidade do escoamento incidente e da interação entre as camadas cisalhantes. Esta taxa de emissão é chamada de frequência de emissão de vórtices [Meneghini et al, 2010].

Logo, o Número de Strouhal é definido na equação (4.8).

$$St = \frac{f_s D}{U} \quad (4.8)$$

onde St é o Número de Strouhal, f_s é a frequência de emissão de vórtices, D o diâmetro do cilindro e U a velocidade livre do movimento relativo.

A frequência de emissão de vórtices tem mesmo valor da frequência de oscilação da força de sustentação no corpo. Logo podendo ser descoberta a partir desta apenas possuindo o seu período [ANSYS, 2009a], como pode ser visto na equação (4.9).

$$f_l = \frac{1}{T_l} \quad (4.9)$$

onde f_l é a frequência da força de oscilação da força de sustentação e T_l o período de oscilação da mesma.

Como o Número de Strouhal é adimensional e característico do escoamento, ele pode ser usado para validar uma simulação computacional.

4.3. MODELAGEM NUMÉRICA

Simulações de grandes escalas envolvem em rodar uma simulação transiente de uma condição inicial, numa malha adequada (apresentada no Apêndice A), usando um passo de tempo apropriado. A simulação deve rodar o tempo suficiente para se tornar independente da condição inicial e habilitar as estatísticas do escoamento a ser determinado [ANSYS, 2009a].

4.3.1. Função de Interpolação

Em volumes finitos, no centro de cada volume de controle são armazenados os valores calculados das variáveis das equações presentes na Seção anterior. Contudo, por existir termos convectivos nas equações que regem o escoamento exige a determinação dos valores dessas variáveis nas faces dos volumes. Então é usada uma função de interpolação, permitindo a obtenção de valores em locais de interesse.

Uma discretização de segunda ordem de precisão é permitida quando usados modelos de turbulência *LES* como um esquema de diferenciação central. Porém, ele as vezes leva a oscilações não físicas no campo de soluções. Logo um esquema de diferenciação central limitada é a melhor escolha para *LES*, o que foi usada neste trabalho [ANSYS, 2009b].

4.3.2. Programa utilizado

No programa utilizado neste trabalho, ANSYS Fluent, é possível empregar dois tipos de *solver*, um baseado na pressão e outro baseado na densidade. Como o trabalho consiste em um escoamento incompressível, ANSYS, 2009b recomenda a utilização do primeiro, baseado em pressão (*pressure-based solver*).

Neste estão disponíveis algoritmos de solução segregada e solução acoplada para resolver os sistemas de equações algébricas gerados das equações diferenciais. Para diminuir o tempo computacional opta-se pela solução segregada, onde os sistemas são resolvidos um por vez, atualizando os coeficientes e criando um cálculo iterativo [Maliska, 2004].

A solução segregada exige a utilização de um método para tratamento do acoplamento dos campos de pressão e velocidade. Isto porque a pressão não possui uma equação em que seja possível a utilização do método iterativo. Assim é usado o algoritmo SIMPLE (*Semi Implicit Linked Equations*) para acoplar pressão e velocidade.

4.3.3. Condição Inicial e Critério de Parada Adotado

É recomendado iniciar rodando uma simulação em regime permanente usando um modelo de turbulência *RANS* qualquer até que o escoamento esteja razoavelmente convergido.

Então causar uma deturpação, gerando uma velocidade instantânea no regime permanente nos resultados *RANS*. Isso criará uma condição inicial muito mais realista para a simulação em *LES*. Adicionalmente, ajudará a reduzir o tempo necessário para a simulação *LES* alcançar resultados mais estáveis [ANSYS, 2009b]

ANSYS, 2009b recomenda que a duração mínima da simulação seja determinada através da equação (4.10).

$$T = \frac{L}{U} \quad (4.10)$$

onde T é o tempo da simulação em seu domínio, L é o comprimento característico do domínio da solução e U é a velocidade média livre do escoamento. Com os valores da Seção 4.4 obtém-se um valor de T igual a 0,2045 s. Para resultados mais confiáveis, a parada foi de pelo menos 5 vezes este valor.

4.3.4. Modelagem da Turbulência

Para solução das equações (4.4) e (4.5) da Seção 4.2.2. optou-se pelo modelo de submalha Smagorinsky-Lilly para resolver em simulações de grandes escalas e foram comparadas com uma simulação *RANS* com modelo $k-\omega$ SST de Akwa et al, 2014. O modelo de Smagorinsky-Lilly encontra-se no Anexo A.

4.4. MODELO COMPUTACIONAL

O domínio é apresentado na Figura 4.1, baseado nas dimensões do canal aerodinâmico do experimento de Akwa, 2014. No modelo computacional foi empregado o *software* comercial ANSYS Fluent. Nele são impostas as condições de contorno, são definidos os métodos de solução, é conduzido o cálculo numérico e é feito o pós-processamento dos resultados numa malha previamente gerada. As simulações presentes apresentadas no trabalho foram em sua maioria realizadas no Centro Nacional de Supercomputação (CESUP).

4.4.1. Geometria

O túnel de vento usado neste trabalho consiste num circuito de canal aberto presente no Laboratório de Mecânica dos Fluidos – UFRGS. Este canal tem uma seção retangular com dimensões de 192 mm de largura, 146 mm de altura e 2045 mm de comprimento. A seção de teste é um cilindro circular liso de 50 mm de diâmetro localizado a 500 mm de distância da entrada de ar do canal, como pode ser visto na Figura 4.1.

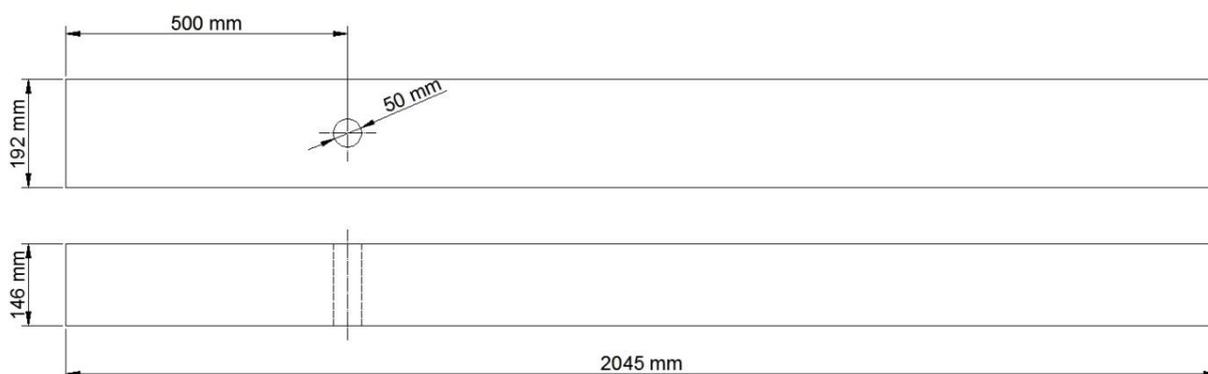


Figura 4.1 – Canal aberto utilizado no túnel de vento deste trabalho e suas dimensões.

O cilindro localizado no canal causa uma razão de bloqueio no valor de 25,91 %. O que é de grande relevância para altos valores de Reynolds [Rae e Pope, 1984].

4.4.2. Condições de Contorno

O fluido em questão foi o ar, considerado incompressível, e com todas as suas propriedades básicas. As condições de contorno utilizadas são as mesmas de outras simulações e experimentos no mesmo túnel de vento do laboratório. Neste trabalho foram usadas as seguintes:

- Velocidade do ar de entrada: 10 m/s de forma homogênea e intensidade de turbulência de 1%;
- Pressão de saída: 0 Pa manométrica;
- Laterais do túnel: parede lisa sem escorregamento;
- Teto e chão do túnel: parede lisa sem escorregamento;
- Cilindro: parede lisa sem escorregamento.

Foi escolhida para a discretização temporal como segunda ordem que é recomendada para simulações *LES* [ANSYS, 2009b]. O passo de tempo adotado foi de $15 \cdot 10^{-5}$ s devido ao tempo disponível para a realização da simulação deste trabalho.

4.4.3. Qualidade da Malha

Como a qualidade de uma simulação em *LES* esta ligada diretamente a qualidade da malha utilizada, que está presente no Apêndice A, vem aparecendo o método de calcular a fração de energia cinética turbulenta modelada, o *MTR* (*Measure od Turbulent Resolution*). Este definido por Pope, 2004 na equação (4.11).

$$MTR = \frac{k_{SM}}{k_{SM} + k_{RES}} \quad (4.11)$$

onde *MTR* é o índice da fração de energia cinética turbulenta modelada que varia de 0 a 1, k_{SM} é a energia cinética turbulenta referente as grandes escalas e k_{RES} é a energia cinética turbulenta referente às escalas submalha.

Em *LES* recomenda-se um valor máximo de 0,2. Isso significa que 20% da energia cinética será modelada, enquanto 80% estará na região resolvida.

Resultados satisfatórios já foram obtidos com malhas menos refinadas e passos de tempo maiores [Kalro, V. e Tezduyar, T., 1997] que as utilizadas neste trabalho.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como este trabalho consiste numa Simulação de Grandes Escalas, serão os resultados que tem o objetivo de justificar utilização desta simulação. Todos os resultados apresentados são instantâneos do período de tempo que a simulação foi finalizada.

5.1. AVALIAÇÃO COMPARATIVA COM DADOS EXPERIMENTAIS

Com os resultados obtidos, pode se encontrar a oscilação da força de sustentação no cilindro. Essa oscilação de força pode ser vista no gráfico da Figura 5.1.

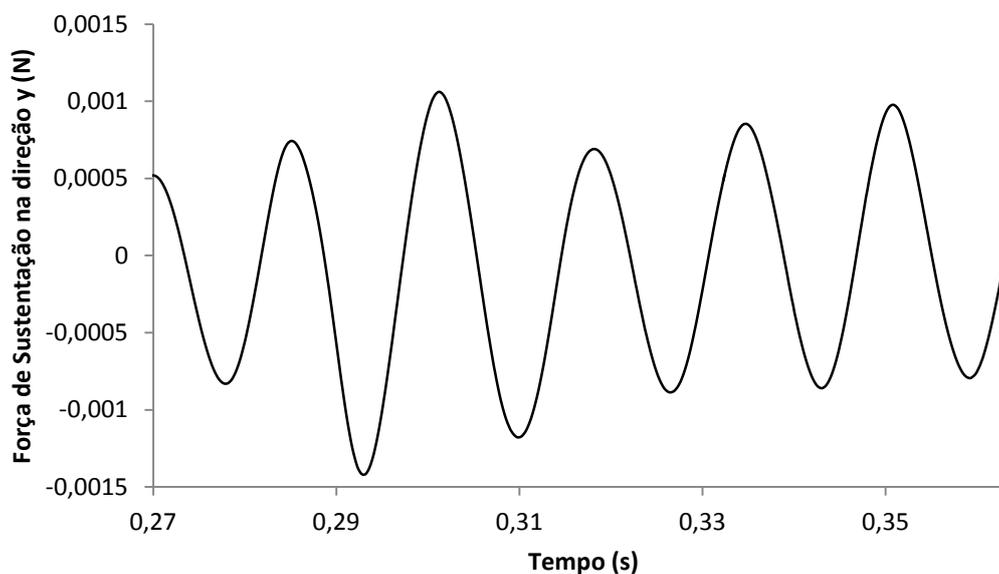


Figura 5.1 – Oscilação da Força de Sustentação no cilindro.

Calculando a frequência a partir do gráfico obtém-se a frequência de emissão de vórtices, como mencionado na Seção 4.2.3. Logo o valor da frequência é de 49,474 Hz.

Usando a equação (4.8) chega-se a um valor para o Número de Strouhal de 0,247. Esse resultado é então comparado com o de uma simulação *RANS* e dados experimentais na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Comparação do Número de Strouhal para outros casos

	<i>RANS</i>	<i>Experimental</i>	<i>LES</i>
Número de Strouhal	0,233	0,246± 0,022	0,247
Frequência de emissão de vórtices (Hz)	49,207	46,875± 4,000	49,474

O resultado do Número de Strouhal deste trabalho se encontra dentro do intervalo de erro quando comparado com o resultado experimental, assim como aquele apresentado utilizando um modelo *RANS*.

Na Figura 5.2 é visto a magnitude da pressão ao longo da parede do canal. O resultado obtido é instantâneo, porém se for feita a média de valores de pressão pode ser comparado com outras simulações. Valores estes que estão apresentados na Figura 5.3.

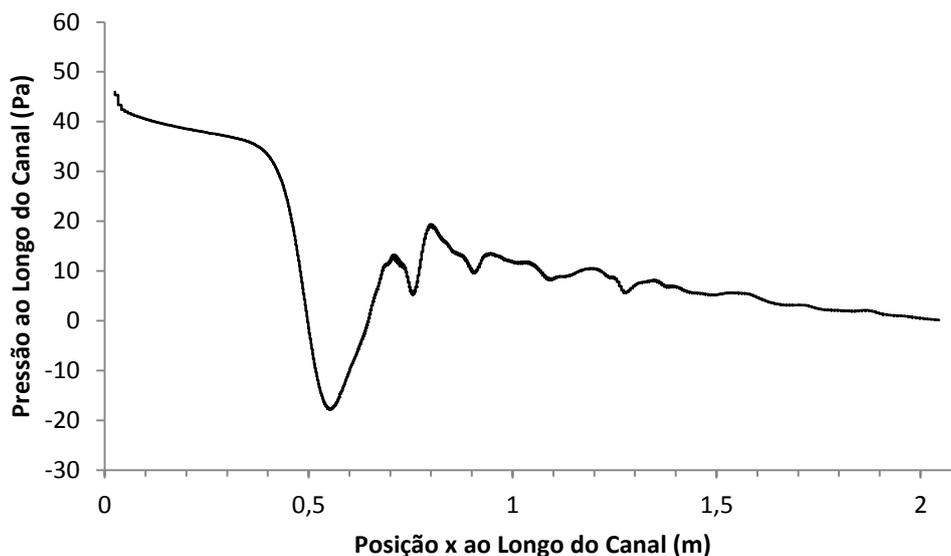


Figura 5.2 – Magnitudes de pressão instantâneas (tempo final) na parede ao longo do comprimento do canal.

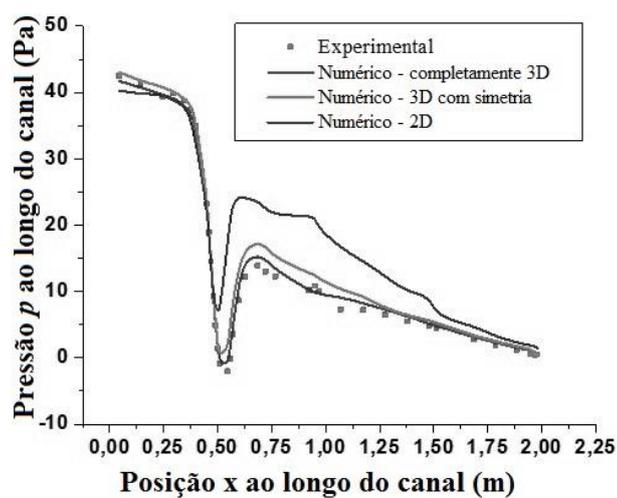


Figura 5.3 – Magnitudes de pressão (média) na parede ao longo do comprimento do canal obtidas experimentalmente e por métodos *RANS* [adaptado Akwa et al, 2014].

Estes resultados podem ser usados para avaliar a simulação, confirmando a semelhança. O mesmo padrão de semelhança pode ser visto quando analisadas a velocidade média do escoamento na saída do túnel. A Figura 5.4 apresenta os valores obtidos por *LES* e a Figura 5.5 apresenta os valores obtidos experimentalmente e de simulações *RANS*.

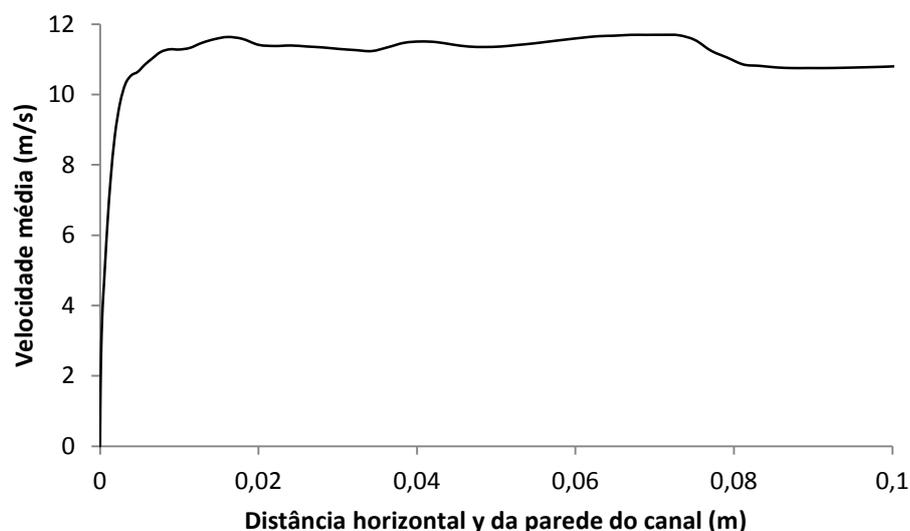


Figura 5.4 – Magnitudes de velocidades instantâneas (tempo final) na saída do canal ao longo da distância horizontal da parede.

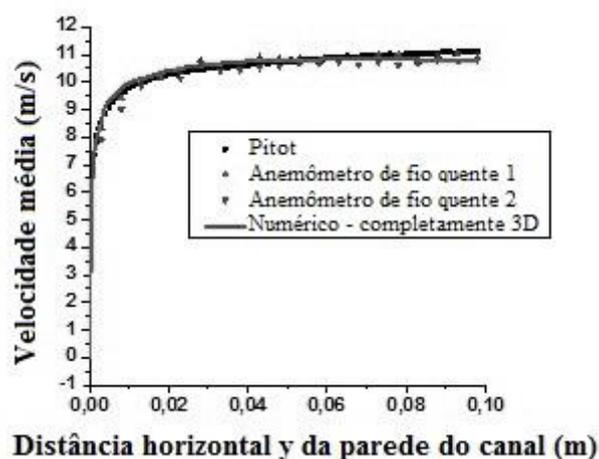


Figura 5.5 – Magnitudes de velocidades na saída do canal ao longo da distância horizontal da parede obtidas experimentalmente e por métodos *RANS* [adaptado Akwa et al, 2014].

5.2. CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

A Figura 5.6 mostra os resultados obtidos por *LES* e a Figura 5.7 apresenta os resultados provenientes de um modelo *RANS*. Pode se observar que, como *RANS* trabalha com valores médios, a formação de vórtices pode ser vista mais claramente. Nos resultados de *LES* é visto o que acontece instantaneamente, simulando detalhes do problema físico real. Os vórtices são emitidos de forma mais aleatória e não tem uma grande uniformidade ao longo da altura do cilindro mostrando a relevância do uso das três dimensões para simulações de corpos cilíndricos.

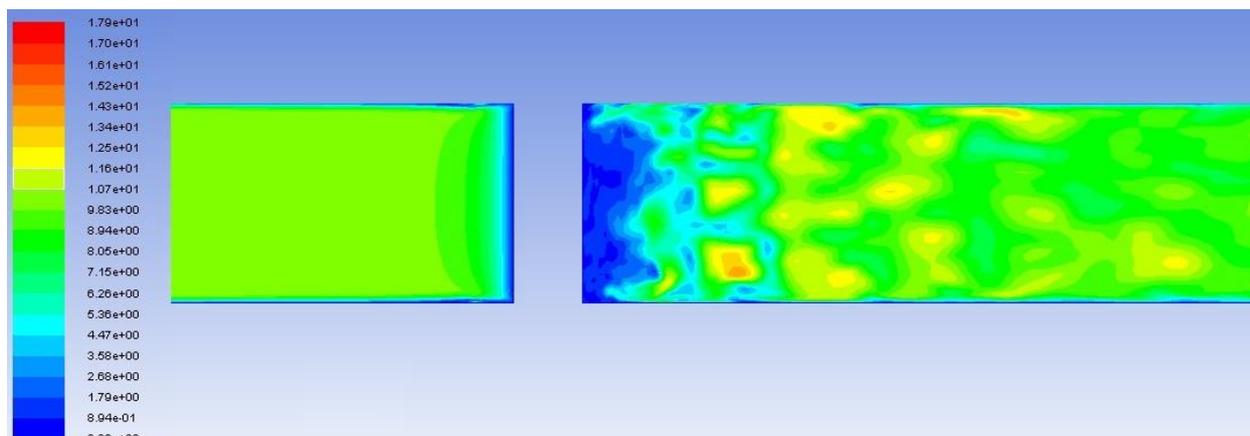


Figura 5.6 – Magnitude dos Vetores Velocidade (m/s) obtidos por *LES* perto da região do cilindro.

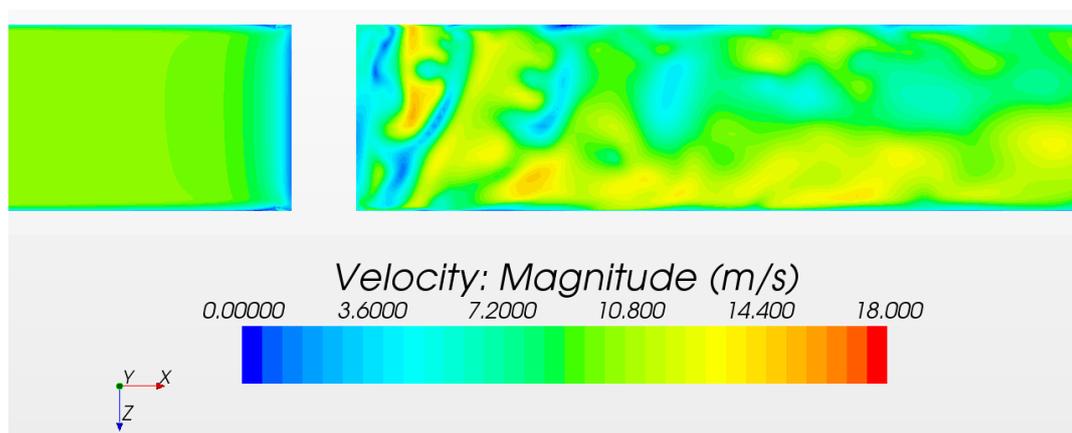


Figura 5.7 – Magnitude dos Vetores Velocidade (m/s) obtidos por *RANS* perto da região do cilindro [Akwa et al, 2014].

Na Figura 5.8 é visto com clareza que os vetores de velocidade possuem magnitudes, direções e sentidos bem variados ao longo da seção. Isto só poderia ser analisado em simulações que apresentem com mais clareza a situação em cada instante de tempo.

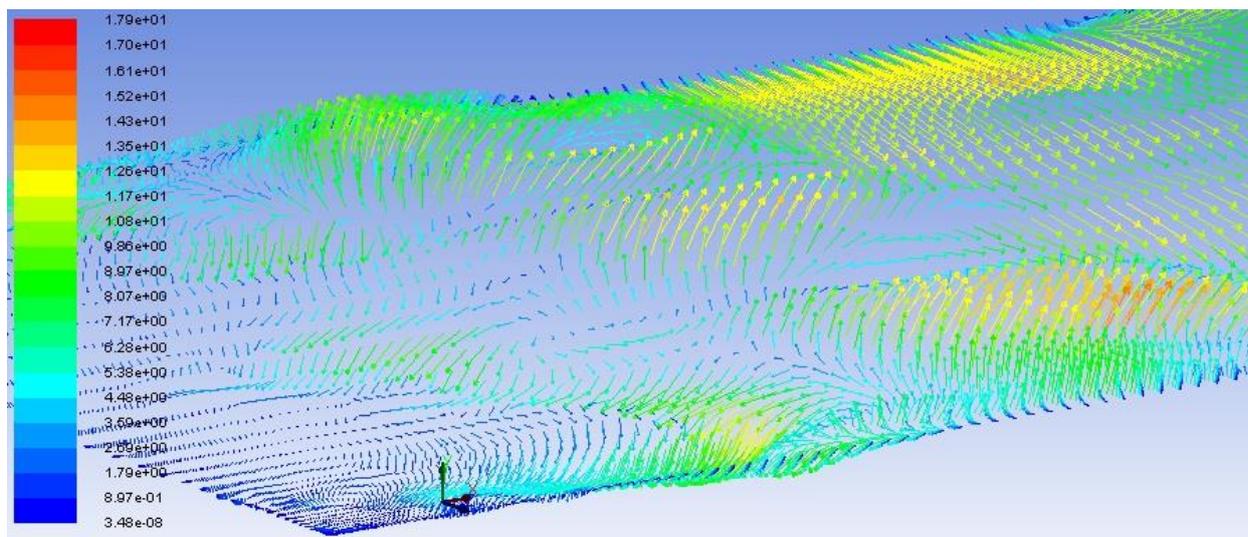


Figura 5.8 – Vetores Velocidade obtidos por *LES* perto da região do cilindro apresentando direção e sentido.

Fazendo um corte no plano z é possível ver com clareza o comportamento da emissão de vórtices após o contato do ar com o cilindro.

Na Figura 5.9 indica o formato dos vórtices, bem como a intensidade de turbulência elevada perto da região do cilindro. A medida em que o escoamento prossegue, nota-se a diminuição da quantidade de vórtices e o escoamento volta a ter características homogêneas, como na entrada do canal.

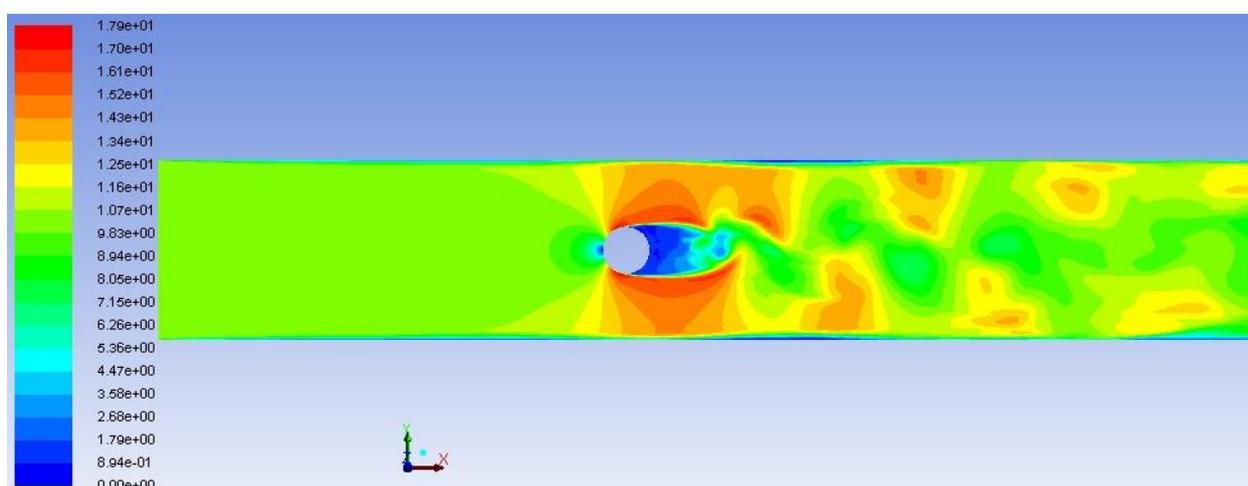


Figura 5.9 – Magnitude da Velocidade (m/s) apresentando o comportamento de criação de vórtices.

Essa emissão de vórtices se deve ao gradiente de pressão formado no cilindro. Na frente, a pressão é positiva e elevada, enquanto atrás a pressão é negativa e seu pico varia de posição na direção y . Isto mostra a dependência deste caso com o tempo, tornando o uso de *LES* uma opção provavelmente mais adequada. Esse gradiente de pressão pode ser visto na Figura 5.10.

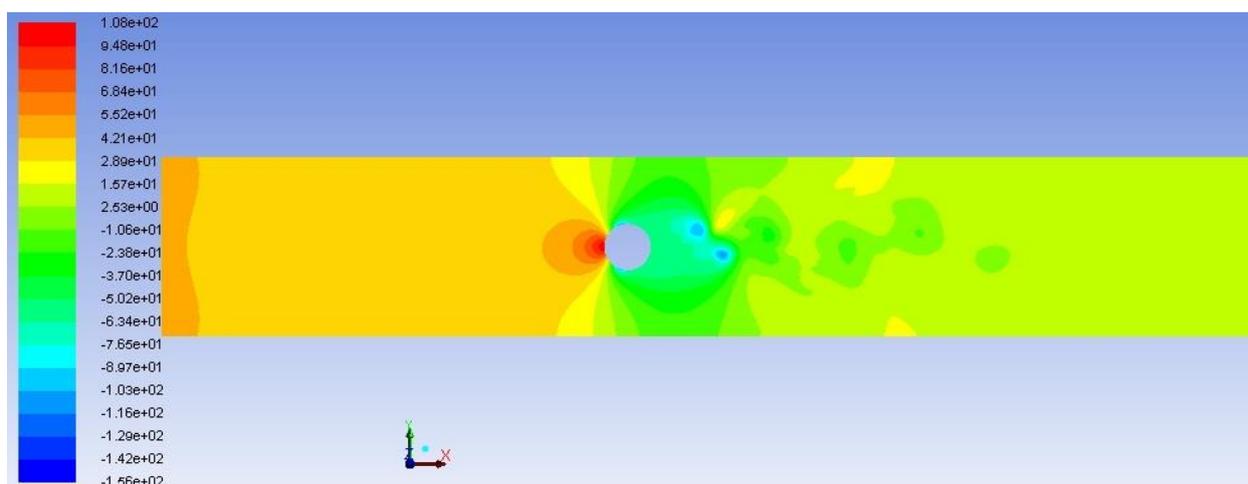


Figura 5.10 – Magnitude da Pressão (Pa) apresentando o comportamento de criação de vórtices.

Como a simulação possui um modelo *LES*, é possível analisar a viscosidade turbulenta na submalha, indicado na Figura 5.11. Esses valores começam a ser significativos após certa distancia x do cilindro, exatamente na região de formação de vórtices.

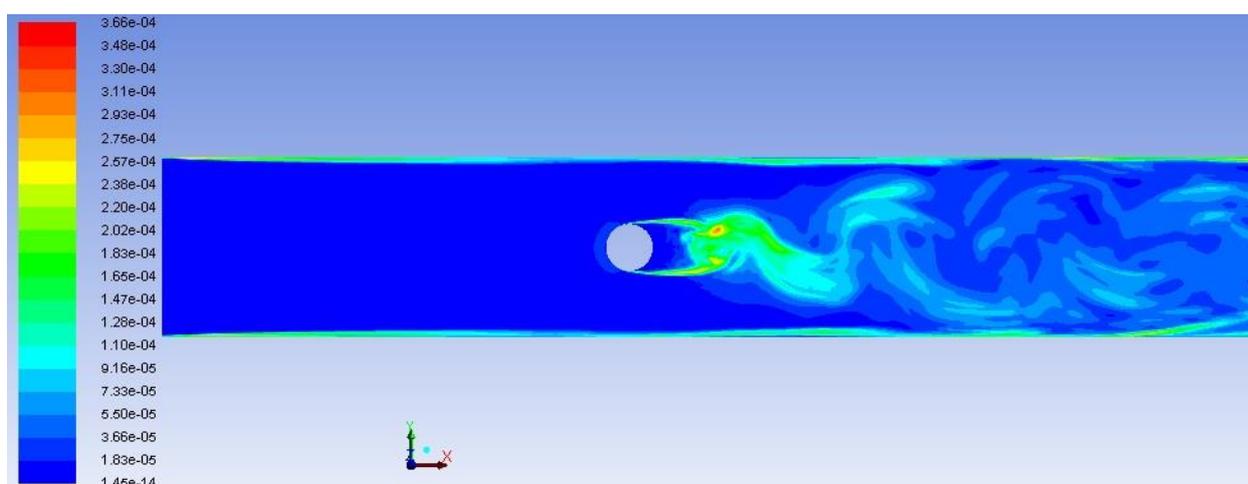


Figura 5.11 – Magnitude da Viscosidade Turbulenta (Pa.s) na submalha apresentando o comportamento de criação de vórtices.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho é utilizada a dinâmica dos fluidos computacional para analisar, através de uma Simulação de Grandes Escalas (*LES*), o comportamento escoamento em torno de um cilindro e sua dependência com o tempo. Esta simulação usa parâmetros empregados por Akwa et al, 2014, em uma análise numérica com Equações Médias de Reynolds (*RANS*) e experimental, visando a avaliação deste trabalho como também uma comparação de resultados.

Na avaliação da simulação foram obtidos resultados favoráveis, com um Número de Strouhal dentro da faixa de erro do experimental, assim como o estudo comparado [Akwa et al,

2014]. Quando analisados os campos de pressão e velocidade, observa-se a semelhança entre os casos e uma maior variação com o tempo para os resultados em *LES*.

Quando analisadas as diferenças entre as simulações, notou-se que existe variação do escoamento nos diferentes planos ao longo da altura do cilindro, o que faz confirmar que o estudo deste escoamento em apenas duas dimensões é uma aproximação inicial. Nos resultados *LES* é visto que a formação de vórtices após o cilindro é bem fragmentada e dependente do instante de tempo analisado, confirmando que esta modelagem representa valores de picos de velocidade e pressão.

Esta análise permite observar o aumento da turbulência após o contato do fluido de trabalho com o cilindro. O comportamento dos vórtices e o tempo em que é feita a análise são importantes para futuros avanços neste estudo.

O estudo do escoamento em torno de cilindros ainda demanda pesquisa. Diversos casos semelhantes podem ser analisados e resultados diferentes podem ser obtidos. Para trabalhos futuros pode-se utilizar um modelo que combine *RANS* e *LES*, para obter um maior número de resultados. Uma avaliação numérica do comportamento do Número de Strouhal em relação à razão de bloqueio que o cilindro gera pode ser estudada. Também a aplicação da simulação para casos mais específicos, como o escoamento em torno de tubulações ou considerando o cilindro como um rotor de uma turbina eólica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akwa, J. V.; Fleck, G. D.; Möller, S. V.; Petry, A. P. “**Numerical Evaluation of the Turbulent Flow over a Circular Cylinder in a Closed Section Aerodynamic Channel with High Blockage Ratio**”, trabalho em análise de publicação na 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belém, Brasil, 2014, 4 p.

ANSYS “**ANSYS Fluent Theory Guide**”, Release 12.0, 2009a, ANSYS, Inc.

ANSYS “**ANSYS Fluent User’s Guide**”, Release 12.0, 2009b, ANSYS, Inc.

De Paula, A. V. “**Estudo Sobre o Fenômeno da Bistabilidade de Escoamentos Turbulentos em Bancos de Tubos de Arranjo Triangular**”, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2008, 140 p.

Jansen, K. E. “**A Stabilized Finite Element Method for Computing Turbulence**”. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., vol 174, pp 299-317, 1999.

Kalro, V.; Tezduyar, T. “**Parallel 3D computation of unsteady flows around circular cylinders**”. University of Minnesota, Minneapolis, USA, 1997, 13 p.

Maliska, C. R. “**Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**”. LTC, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.

Meneghini, J. R.; Ássi, G. R. S.; Orselli, R. M.; Carmo, B. S.; Saltara, F.; Gioria, R. S.; Bonatto, A.; Tsiloufas, S. “**Turbulência**”. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, vol. 7, pp 259-322, 2010.

Pope, S. B. “**Ten Questions Concerning the Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows**”. New Journal of Physics, v. 16, pp 1-24, 2004.

Rae, W. H.; Pope, A. “**Low-Speed Wind Tunnel Testing**”. John Wiley & Sons, 2nd edition, USA, 1984.

Silveira, R. S.; Moller, S. V. “**Efeito da Razão de Bloqueio sobre o Número de Strouhal em escoamentos em Cilindros**”. VII Escola de Primavera de Transição e Turbulência, Ilha Solteira, Brasil, 2010, 7 p.

Star-CCM+ “**Metodologia**”. CD-adapco, 2008.

APÊNDICE A – Detalhes da malha utilizada no trabalho

A Tabela A. Lista todas as características da malha utilizada. Como a quantidade de volumes finitos e suas regiões.

Nas Figuras A.1 e A.2 é representado os detalhes da malha. Na Figura A.1 pode ser visto o aumento do refino dos volumes a medida que se aproximam do cilindro. Já na Figura A.2 pode ser visto a malha na parede do cilindro.

Tabela A – Quantidade de volumes/faces/elementos por região na malha do trabalho.

	<i>Quantidade</i>
Total de volumes	5.901.804
Total de faces no teto	82.365
Total de faces no chão	82.365
Total de faces na entrada	9.450
Total de faces na saída	9.450
Total de faces no cilindro	21.000
Total de faces na parede A	33.180
Total de faces na parede B	33.180
Total de faces no interior	17.161.155
Total de elementos hexaédricos no interior	5.765.550

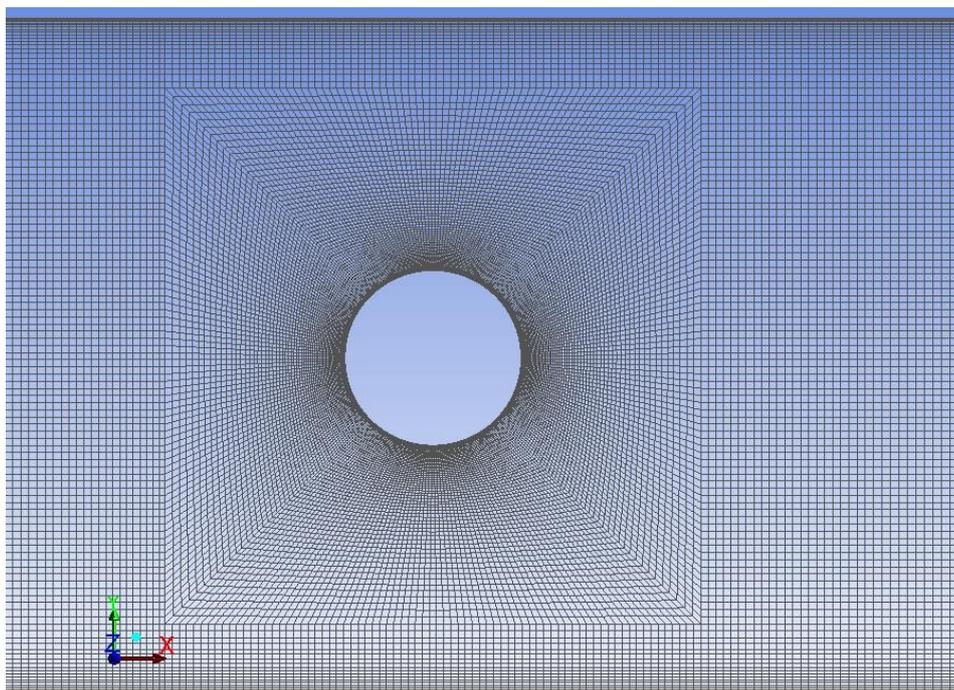


Figura A.1 – Malha da região do cilindro onde existe maior refino.

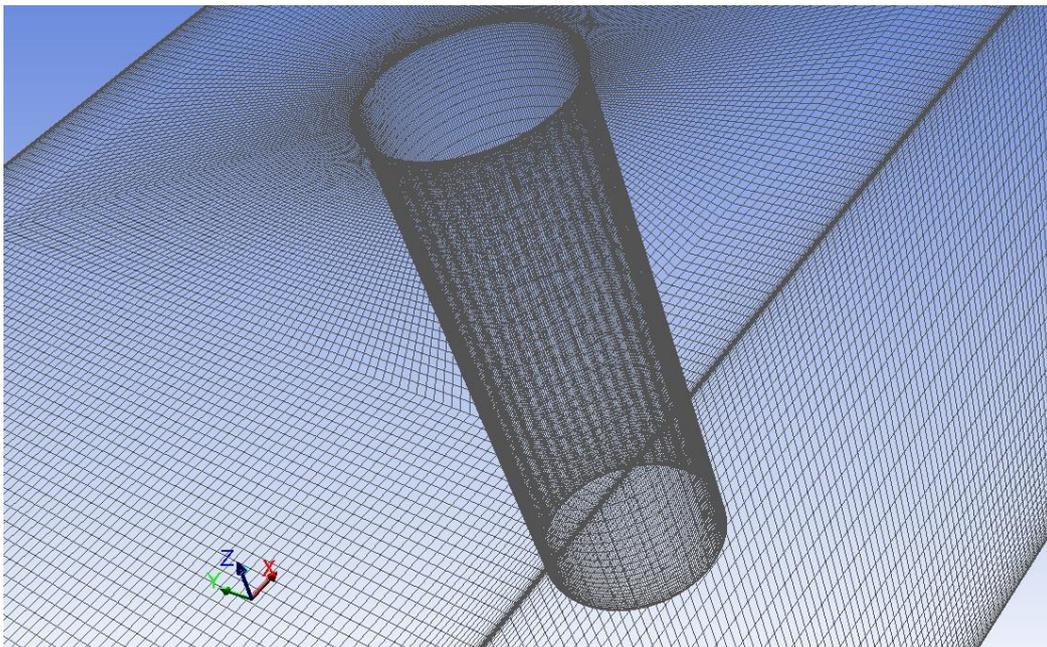


Figura A.2 – Malha da região da parede do cilindro ao longo de sua altura.

ANEXO A – Modelo de Smagorinsky-Lilly

Este simples modelo foi primeiramente proposto por Smagorinsky. No modelo de Smagorinsky-Lilly a viscosidade turbulenta é modelada pela equação A.1.

$$\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}| \quad (\text{A.1})$$

onde L_s é o comprimento de mistura para submalhas e $|\bar{S}| \equiv \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}}$. No Fluent L_s é calculado usando a equação (A.2).

$$L_s = \min\left(\kappa d, C_s V^{\frac{1}{3}}\right) \quad (\text{A.2})$$

onde κ é a constante de von Kármán, d é a distância à parede mais próxima, C_s é a constante de Smagorinsky e V é o volume do elemento computacional.

Lilly derivou a constante de Smagorinsky ao valor de 0,17 para turbulência homogênea isotrópica numa sub-escala inercial. Entretanto, descobriu-se que esse valor descartava excessivas flutuações de grandes escalas na presença de cisalhamento médio e em escoamentos transientes próximos a contorno sólidos, e deve ser diminuído nessas regiões. Ou seja, a constante de Smagorinsky não é uma constante universal, que é a aproximação mais séria neste simples modelo. Assim, adota-se o valor de 0,1 a constante por apresentar os melhores resultados numa grande escala de escoamentos, essa então é a padrão do Fluent. [ANSYS, 2009a].